

УДК 621.762

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВЫТЯЖКОЙ ДЕТАЛЕЙ РАДИАЛЬНЫХ И РАДИАЛЬНО-УПОРНЫХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

**Н. И. СТРИКЕЛЬ, М. И. ЛИСКОВИЧ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### Введение

При создании машин и аппаратов новых типов с высокими технико-экономическими характеристиками, а также при модернизации действующих машин и аппаратов необходимо решать задачу повышения их долговечности.

Для выполнения этой задачи необходимо обеспечить комплексное упрочнение машин и оборудования, повышение износостойкости, коррозионной стойкости, жаростойкости и др.

Научный анализ проблемы повышения надежности и долговечности машин показал, что в настоящее время немыслимо решить вопрос увеличения срока службы машин путем применения для изготовления деталей в большом объеме дорогих высоколегированных материалов и цветных сплавов, так как достигаемая при этом долговечность в большинстве случаев экономически не оправдывается.

Поэтому чрезвычайно важным становится путь повышения износостойкости деталей машин из обычных конструкционных сталей за счет нанесения на их поверхность покрытий. При этом расход дорогих, дефицитных материалов минимален, а эффект повышения долговечности может оказаться более значительным, так как в тонких поверхностных слоях можно получить более высокие физико-механические свойства, чем в монолитных деталях.

Таким образом, целесообразно основную часть детали изготавливать из малодефицитного (дешевого) материала с хорошими (достаточными) технологическими свойствами и высокой сопротивляемостью внутренним напряжениям, а по поверхности – из материала, обладающего высокой сопротивляемостью поверхностным процессам (коррозии, изнашиванию и т. д.).

### Постановка задачи

Изготовление втулок подшипников скольжения из металлофторопластовой ленты отрезкой и гибкой в штампе приводит к образованию стыка согнутых краев полосы неблагоприятно влияющего на работу подшипникового узла при значительных вибрациях и ударах, если втулка подшипника неподвижна, а ось вращается. При вращении втулки отрицательное влияние стыка согнутых краев полосы становится еще более существенным. Лишены этого недостатка не содержащие стыка согнутых краев цельнотянутые втулки, изготавливаемые совместной вытяжкой стального и антифрикционного слоев в соответствии с разработанным в ГГТУ имени П. О. Сухого способом [1], [2].

Задачей работы является определение и обоснование новых технологических решений, расширяющих возможности получения деталей подшипников скольжения вытяжкой. Новизна разработки подтверждается наличием патентов ВУ 3933 [1] и

ВУ 10955 [2] на новый способ изготовления полых композиционных изделий. Актуальность работы подтверждается ее направленностью на разработку инновационной технологии изготовления изделий с повышенными эксплуатационными характеристиками. Научная новизна работы подтверждается получением неизвестных ранее аналитических зависимостей для расчета усилия вытяжки композиционных полых изделий и напряжений, возникающих в стенке вытягиваемого изделия.

### Разработка аналитических зависимостей

Проведенные опыты доказали возможность нанесения антифрикционного слоя не только на боковую, но и на донную часть вытянутого стального стакана, а это, в свою очередь, позволяет использовать вытяжку для изготовления не только радиальных втулок, но и радиально-упорных подшипников скольжения.

На рис. 1 дана схема втулки радиально-упорного подшипника скольжения.

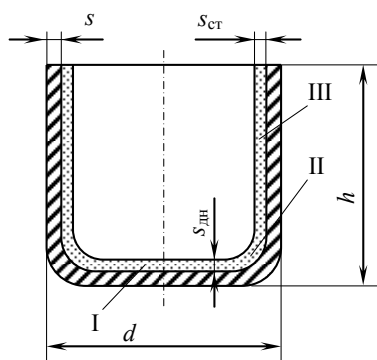


Рис. 1. Схема втулки радиально-упорного подшипника

Рассматривая процесс нанесения антифрикционного покрытия, можно выделить три основные зоны: I — донная часть; II — радиусный переход от донной части к боковым стенкам; III — боковые стенки.

Толщина  $S_{дн}$  покрытия донной части, ее пористость и основные свойства будут существенно зависеть от величины давления, приложенного к этой части при нанесении покрытия. Подбирая требуемую начальную высоту засыпки металлопорошка и величину давления на донную часть можно добиться требуемых значений толщины  $S_{дн}$  и пористости покрытия донной части.

Толщина  $S_{ст}$  покрытия боковых стенок, а также толщина  $S_p$  покрытия в зоне радиусного перехода от донной части к боковым стенкам, их пористость и основные свойства существенно зависят от соотношения диаметров стальной заготовки, пуансона и матрицы, определяющих степень деформации покрытия при вытяжке, которая в свою очередь обуславливает величину давления и пористость покрытия.

Для покрытия донной части, чтобы добиться заданного значения относительной плотности  $\vartheta$  покрытия, требуется приложить давление  $p$ , определяемое по формуле [3]:

$$p = \vartheta^2 \frac{\vartheta - \vartheta_0}{1 - \vartheta} p_k, \quad (1)$$

где  $\vartheta_0$  — начальное значение относительной плотности порошка;  $p_k = 3\sigma_b$  — критическое давление;  $\sigma_b$  — предел прочности материала порошка.

При вытяжке с противодавлением величина усилия противодействия  $p_{\text{пр}}$  будет равна

$$p_{\text{пр}} = pF_{\text{пр}}, \quad (2)$$

где  $F_{\text{пр}}$  – площадь противодействия.

На рис. 2 приведена схема штампа для вытяжки с противодавлением.

Предварительно вытянутая металлическая полая заготовка 4 с засыпанным порошком 5 для антифрикционного покрытия устанавливается на матрицу 2 и контрпуансон 3. Под воздействием пуансона 1 и контрпуансона 3 происходит уплотнение порошка донной части и частичное его вытеснение в кольцевую часть между стенками металлической поллой заготовки 4 и пуансоном 5. Преодолевая сопротивление контрпуансона 3, пуансон 1 проталкивает заготовку 4 через матрицу 2, обеспечивая вытяжку металлической заготовки и одновременное нанесение антифрикционного покрытия на боковые стенки вытягиваемого металлического стакана.

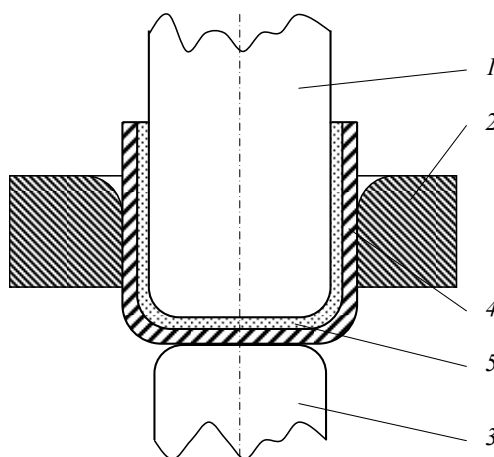


Рис. 2. Схема штампа для вытяжки с противодавлением: 1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – контрпуансон; 4 – полая металлическая заготовка; 5 – порошок

Усилие на пуансоне  $p_{\text{п}}$  при этом будет определяться как сумма усилия вытяжки  $p_{\text{выт}}$  и усилия противодействия  $p_{\text{пр}}$ :

$$p_{\text{п}} = p_{\text{выт}} + p_{\text{пр}}. \quad (3)$$

На рис. 3 дана схема вытяжки полого композиционного изделия. Порошок оловянистой бронзы 4 размещали между боковыми стенками предварительно вытянутой стальной поллой заготовки 3 и пуансоном 1 и производили вытяжку в штампе через матрицу 2 с противодавлением со стороны контрпуансона 5.

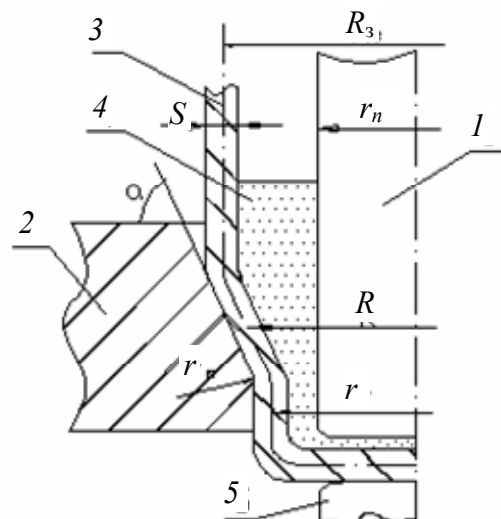


Рис. 3. Схема вытяжки с противодавлением: 1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – стальная полая заготовка; 4 – порошок оловянистой бронзы; 5 – контрпуансон

После спекания в вакуумной электропечи при температуре 925 °С в течение 25 минут по подобной же схеме размещали между спеченным бронзовым слоем и пуансоном фторопласт в дисперсном виде и производили еще одну операцию вытяжки, достигая полного заполнения пор фторопластом, затем производили полимеризацию фторопласта при температуре 390 ° в течении 4,5 часов.

Для определения действующих усилий и напряжений при вытяжке выделим в очаге деформации кольцевой элемент высотой  $dR$ , приведенный на рис. 4.

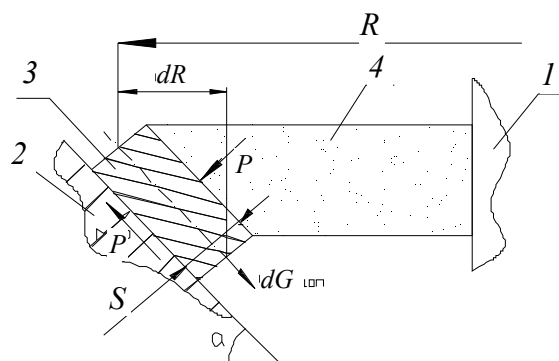


Рис. 4. Схема кольцевого элемента

Примем в первом приближении, что величина давления  $p$  со стороны порошкового слоя 4 на стальную заготовку 3 на конусном участке очага деформации может быть определена по формуле

$$p = \frac{p_k(R_3 - R)}{R_3 - r}, \quad (4)$$

где  $R_3$  – радиус полый стальной заготовки 4 перед вытяжкой (см. рис. 3);  $r$  – радиус стального слоя в изделии;  $R$  – радиус стальной заготовки в очаге деформации;  $p_k$  – давление в порошковом слое при  $R = r$ .

Рассматривая равновесие сил, приложенных к кольцевому элементу очага деформации (см. рис. 4), получаем дифференциальное уравнение для определения до-

полнительных напряжений  $\sigma_{\text{доп}}$  в стальной заготовке, появляющихся при совместной вытяжке стального и металлопорошкового слоев по сравнению с вытяжкой такой же стальной заготовки без порошка:

$$d\sigma_{\text{доп}} = \frac{\mu \cdot p_k}{s \cdot \cos \alpha (R_3 - r)} (R_3 - R) \cdot dR, \quad (5)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения между стальной заготовкой и матрицей;  $s$  – толщина стенок стальной заготовки;  $\alpha$  – угол конусного отверстия в матрице.

После интегрирования и использования для определения постоянной интегрирования условия

$$\sigma_{\text{доп}} = 0 \text{ при } R = R_3 \quad (6)$$

получим расчетную зависимость для определения максимального значения дополнительного напряжения в конце очага деформации при  $R = r$  в следующем виде:

$$\sigma_{\text{доп}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\mu \cdot p_k (R_3 - R)^2}{s \cdot \cos \alpha (R_3 - r)}. \quad (7)$$

Максимальное полное напряжение растяжения  $\sigma_{\text{п}}$  в стальной заготовке в конце очага деформации определим по формуле

$$\sigma_{\text{п}} = \sigma_0 + \sigma_{\text{доп}}, \quad (8)$$

где  $\sigma_0$  – максимальное растягивающее напряжение в стальной заготовке при вытяжке без порошка может быть рассчитано по известному выражению [4, с. 168]:

$$\sigma_0 = \sigma_s \left( \left( 1 + \frac{\mu}{\tan \alpha} - \sqrt{\frac{s}{R_3}} \cdot \mu \cos \alpha \left( 1 - \frac{r}{R_3} \right) + \sqrt{\frac{s}{R_3}} \cdot \sin \alpha + \frac{s}{2r_m + s} \right) (1 + \mu \alpha) \right), \quad (9)$$

где  $\sigma_s$  – сопротивление металла заготовки пластическому деформированию;  $r_m$  – радиус скругления матрицы.

Выражение (9) получено совместным решением уравнения равновесия и условия пластичности.

Величину усилия совместной вытяжки без противодействия рассчитываем по формуле

$$P = 2\pi r S \sigma_{\text{п}}. \quad (10)$$

С учетом проталкивания через матрицу максимальное усилие вытяжки будет равно

$$P_{\text{max}} = k_{\text{пр}} P, \quad (11)$$

где  $k_{\text{пр}} = 1,2-1,3$  – коэффициент проталкивания ([4, с. 171]).

Величину относительного обжатия порошка при совместной вытяжке определим следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{2R_3 - S - 2r_{\text{п}}}{2r - S - 2r_{\text{п}}}. \quad (12)$$

Плотность порошкового слоя  $\rho_n$  в г/см<sup>3</sup> определим из эмпирической зависимости [5, с. 102]:

$$\rho_n = a + b \cdot \varepsilon, \quad (13)$$

где  $a$  и  $b$  – опытные коэффициенты.

При вытяжке для порошка оловянистой бронзы  $a = 4,485$ ,  $b = 0,242$ . Величину давления в порошковом слое  $p_k$  определим по опытным данным, приведенным в работе [5] в зависимости от плотности порошкового слоя  $\rho_n$ . Так как в [5] доказана опытным путем схожесть таких же зависимостей, получаемых при вытяжке и прессовании, то можно использовать рекомендации справочников по порошковой металлургии.

### Методы испытаний

Разработанное экспериментальное устройство для проверки аналитических зависимостей представляет собой штамп со сменными пуансонами и матрицами для совместной вытяжки. Штамп устанавливается на универсальную испытательную машину, что позволяет регистрировать усилие совместной вытяжки и диаграмму «усилие – ход пуансона» при вытяжке без противодействия.

Штамп (рис. 5) состоит из блока, содержащего верхнюю 1 и нижнюю 2 плиты, направляющих колонок 3 и втулок 4. В верхнюю часть блока ввинчивается хвостовик 5. Сменный пуансон 6 крепится к верхней плите с помощью пуансонодержателя 7. Сменная матрица 8 устанавливается в отверстие матрицедержателя 9, который, в свою очередь, закреплен на нижней плите блока.

Все пуансоны имеют одинаковые присоединительные размеры, отличаясь только величиной диаметра  $d_n$ ; матрицы, имеющие одинаковые наружные размеры, различаются углом наклона  $\alpha$  в конической части.

Пуансоны и матрицы изготовлены из углеродистой инструментальной стали У10А и термообработаны на твердость HRC<sub>3</sub> 58–60. Шероховатость посадочных поверхностей матриц и пуансонов, а также рабочих поверхностей пуансонов  $R_a$  1 мкм. Фланцевые, радиусные поверхности и поверхности отверстий в матрицах полированы  $R_a$  0,1 мкм.

Конструкция штампа позволяет установить полиуретановую пружину и металлическое прижимное кольцо, обеспечивая прижим заготовки при вытяжке.

Листовые заготовки из подвергаемых вытяжке металлов диаметром от 25 до 70 мм, толщиной  $s = 1,0; 1,5; 2,0; 3,0$  мм применяются для первого перехода вытяжки.

Нанесение покрытия на донную часть производили перед вытяжкой, установив на матрицу плоский диск, а на него полу заготовку с порошком.

Вытяжке подвергались стальные заготовки (сталь 08кп ВГ). Для эксперимента использовались следующие материалы:

- для антифрикционного покрытия – композиционный материал на основе порошковой оловянистой бронзы;
- в качестве наполнения – фторопласт Ф-4 в дисперсном виде.

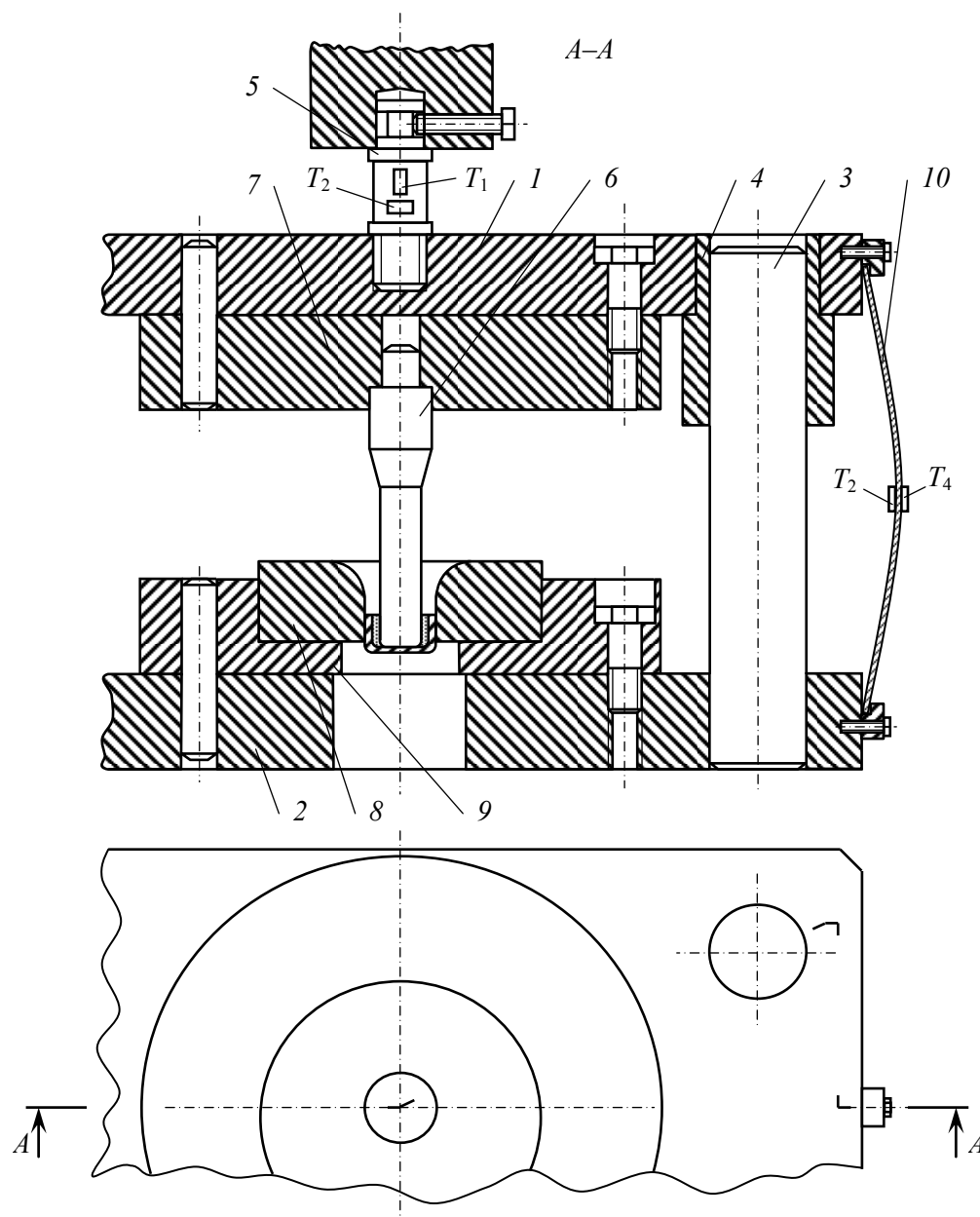


Рис. 5. Схема экспериментального штампа

### Результаты эксперимента

Проверка расчетной зависимости усилия вытяжки без противодействия проведена при вытяжке композиционных изделий без утонения стенок стального слоя. Результаты расчетов и испытаний даны в таблице.

### Результаты расчетов и испытаний

Номер серии опытов	Толщина заготовки, $S$ , мм	Радиус пуансона, $r_{п}$ , мм	Обжатие порошка, $\varepsilon$	Усилие вытяжки, кН			
				Без порошка		С порошком	
				расчет	опыт	расчет	опыт
1	1,4	8,5	2,6	21,5–23,2	23	21,6–23,4	23,6
2	1,4	9,1	3	21,5–23,2	23,2	22,1–24	25
3	1,05	9,5	5	16,1–17,5	15,8	17,1–18,5	18,8
4	1,05	9,75	9,8	16,1–17,5	15,5	18,8–20,3	20,9

Расчеты производились для двух значений коэффициента проталкивания  $k_{пр} = 1,2$  и  $k_{пр} = 1,3$ . В каждой серии проведено по 5 опытов. В качестве результата использовано среднее арифметическое по каждой серии опытов.

Сравнение опытных и расчетных значений свидетельствует о возможности использования разработанных математических моделей для определения напряжений и усилий вытяжки втулок подшипников скольжения.

Опыты по нанесению покрытия на донную часть вытягиваемой заготовки доказали возможность изготавливать вытяжкой как радиальные, так и радиально-упорные подшипники скольжения.

Испытания втулок, изготовленных вытяжкой, дали следующие результаты: при циклической нагрузке 125 МПа, скорости скольжения 0,785 м/с в течение 100000 циклов коэффициент трения составлял: в начале испытаний – 0,036, в конце испытаний – 0,041, износ составил 0,06 мм. Пористость бронзового слоя составила 56 %. Заполнение пор фторопластом – 100 %.

При тех же условиях испытаний для втулок, изготовленных гибкой коэффициент трения в начале испытания составил 0,075, а в конце испытания – 0,238, износ – 0,21 мм. Пористость спеченного бронзового слоя составила 30 %. Заполнение пор фторопластом – 60 %. Испытания показали, что антифрикционные свойства втулок изготовленных вытяжкой существенно выше свойств изготовленных гибкой.

### Заключение

Таким образом, разработана аналитическая зависимость для расчета напряжений и усилий вытяжки композиционных втулок подшипников скольжения без противодействия и с противодействием, проведена опытная проверка расчетной зависимости усилия при совместной вытяжке композиционных втулок подшипников скольжения.

Разработанные аналитические зависимости для расчета усилия вытяжки с противодействием (3), дополнительного напряжения (7), полного напряжения (8), усилия совместной вытяжки (10) и (11), могут быть рекомендованы для использования на практике при разработке технологических процессов вытяжки композиционных изделий, а также при изучении соответствующего курса лекций.

Процесс вытяжки композиционных втулок может быть рекомендован для изготовления втулок радиальных и радиально-упорных подшипников скольжения.

Учитывая ряд достоинств способа получения антифрикционных втулок вытяжкой целесообразно продолжение исследований в данном направлении.

### Литература

1. Стрикель, Н. И. Способ изготовления полого композиционного изделия: пат. ВУ 3933 / Н. И. Стрикель, Ю. Л. Бобарикин, М. И. Лискович // Офиц. бюл. – 2001. – № 2.
2. Способ изготовления полого композиционного изделия: пат. ВУ 10955 / Н. И. Стрикель, Ю. Л. Бобарикин, М. И. Лискович, Д. А. Пархоменко // Офиц. бюл. – 2008. – № 4.
3. Бальшин, М. Ю. Основы порошковой металлургии / М. Ю. Бальшин, С. С. Кипарисов. – Москва: Металлургия, 1978.
4. Зубцов, М. Е. Листовая штамповка / М. Е. Зубцов. – Ленинград: Машиностроение, 1980.
5. Изменение плотности металлопорошка при прессовании и вытяжке полых композиционных изделий / Н. И. Стрикель [и др.] // Материалы, технологии, инструменты. – Т. 11 (2006). – № 1. – С. 101–104.